

研究課題名：変動惑星圏シミュレーション

¹寺田直樹、¹加藤雄人、²藤原均、¹寺田香織、
³荻野瀧樹、³梅田隆行、⁴石井克哉、⁴永井享

¹ 東北大学大学院理学研究科、² 成蹊大学理工学部

³ 名古屋大学太陽地球環境研究所、⁴ 名古屋大学情報基盤センター

概要

惑星大気・プラズマ環境におけるマイクロ秒～数十億年スケールの時間変動、及びその蓄積によって生じる惑星圏システムの多様性を明らかにすべく、惑星圏変動の各々の時間スケールにおける特徴的な課題を遂行する。

1. 研究の目的と意義

惑星大気・プラズマ環境におけるマイクロ秒～数十億年スケールの時間変動、及びその蓄積によって生じる惑星圏システムの多様性を明らかにすべく、本研究グループが現有する(a) 惑星形成場、(b) 惑星圏長期変動（数千万年～数十億年）、(c) 惑星圏中期変動（数分～数十年）、(d) 惑星圏短期変動（マイクロ秒～秒）の数値シミュレーションコードを適用・拡充発展させ、惑星大気・プラズマの変動と進化に係る統合的知見を得ることを目的とする。星・惑星形成過程や、惑星圏環境の時間変動、及びその蓄積によって生じる多様性を理解することは、我々がどこから来てどこに向かうのかという根源的な問題を知る上で重要である。近年のコンピュータの計算能力の発達に伴って、多圏間結合過程やマルチ物理現象、多様な時間スケールの現象を統合的に理解することが可能となりつつあるが、本研究では、まずは(a)(b)(c)(d)の各課題を遂行し、それぞれの時間スケールにおける特徴的な惑星圏変動現象の理解を深める。そして将来的にそれらを統合的な視点で繋ぎ合わせ、惑星圏環境の変動現象とその蓄積によって生じる多様性をモデルとして統合するための足がかりを創ることを目標とする。

2. 研究成果の詳細

(a) 惑星形成場シミュレーション

降着円盤中の磁気回転不安定性および磁気

乱流応力の背景磁場配位に対する依存性を明らかにすべく、抵抗性の磁気流体力学シミュレーションコードを RCIP-CMoCCT 法に基づいて構築し、降着円盤の局所シアリングボックスモデルを用いて様々な背景磁場配位における数値実験を実行した。そして、磁気回転不安定性の非線形段階における磁気乱流応力が、背景磁場の鉛直成分と方位角成分の両者に依存し、単調な依存性を示さないことを明らかにした。特に、磁場の方位角成分で計算したプラズマベータが 200 となる点において、磁気乱流応力が極小となることを示した。また、磁気回転不安定性の非線形段階における磁気乱流応力と磁場・速度・密度変動の空間配位の時間発展を調べ、円盤厚み程度の波長を持つ最大成長モードが、急峻な成長・飽和・緩和を繰り返すことを示した。磁場・速度・密度変動の位相関係を解析し、非線形段階における飽和過程には、ケルビン-ヘルムホルツ不安定性型のパラサイト不安定性が本質的な役割を果たすことを明らかにした。

(b) 惑星圏長期変動シミュレーション

惑星大気の進化において、大気の宇宙空間への散逸が果たす役割を定量的に評価すべく、流体力学的散逸の数値実験を行った。本研究では地球型惑星大気の時間変動を追

うことが可能な遷音速多成分流体力学的散逸モデルの開発を進め、まずは H_2 単一大気を仮定して条件を様々に変えて散逸率や大気構造の変化を調べた。地球、金星、火星の各時代（太陽年代 1 億年、10 億年、45 億年）において、大気構造と散逸率を調べた結果、流体力学的散逸にとっては太陽 EUV 放射の強さよりも惑星質量の方が重要なパラメータであり、EUV 放射の増大に対して、質量の重い惑星の方がより大きな影響を受けることが分かった。また、先行研究によって見積もられている惑星形成期における初期水量に対して、 H_2 単一大気の仮定のもとでは、地球ではその歴史の中で全てを散逸させることができず、火星では全散逸が可能であることを示した。

(c) 惑星圏中期変動シミュレーション

前述の流体力学散逸モデルを用いて、太陽フレアなどの数分～時間の変動（中期変動）が流体力学的散逸に及ぼす影響を調べた。太陽系の初期には、現在の太陽フレアよりも 2 桁ほど大きな規模のフレアが高頻度（1 日に数回）で発生していたことが観測的に示唆されており、太陽フレアが初期惑星大気の流体力学的散逸に及ぼす影響を調べることは重要である。数値実験では、現在の最大規模の太陽フレア（1-20nm の波長域は最大 60 倍、20-105nm は最大 6 倍増加）を模擬した太陽 EUV 放射の時間変化を与えた。その結果、 H_2 単一大気の外圏底温度は 1.5 時間ほどで 12K 上昇し、フレアから 8 時間以上経過した後も 6K 程度温度は上昇したままだった。外圏および上端での散逸率は 1 回のフレアで 10%前後の上昇が見られ、これも温度と同様に長い時定数で元の散逸率に戻ることが分かった。連続フレアを導入した場合には、温度、散逸率の蓄積効果が発生することを確認した。

(d) 惑星圏短期変動シミュレーション

惑星電磁圏において生じる高周波のプラズ

マ波動による粒子加速・加熱過程の定量的理解を目的として、大規模計算機実験を行った。特に本研究では、地球磁気圏・放射線帯領域で発生し、相対論的電子加速過程において重要な役割を果たすとされるプラズマ波動ホイッスラーモード・コーラス放射の発生過程について着目し、従来の計算機資源では実現できなかった大きなシミュレーション空間と多数の粒子を用いた計算機実験を実施した。その結果、背景の磁気圏構造の空間スケールが、発生するコーラス放射の波動特性を決定するパラメータとなっている事を明らかとした。また、空間二次元コードの開発を進め、コールド電子の数密度が動径方向に勾配を持つ双極子磁場中において、コーラス放射のダクト伝搬過程を再現できることを確認した。

3. 研究成果リスト

(1) 学術論文（投稿中のものは「投稿中」と明記）

1. Sai, K., Y. Katoh, N. Terada, and T. Ono, Effect of background magnetic field on turbulence driven by magnetorotational instability in accretion disks, *Astrophysical Journal*, 767, 165, doi:10.1088/0004-637X/767/2/165, 2013.
2. Matsuda, K., N. Terada, Y. Katoh, and H. Misawa, A simulation study of the current-voltage relationship of the Io tail aurora, *Journal of Geophysical Research*, 117, A10214, doi:10.1029/2012JA017790, 2012.
3. Matsuda, K., Y. Katoh, N. Terada, and H. Misawa, A simulation study of Io-related Jovian decametric radiation: Control factor of occurrence probability, submitted to *Journal of Geophysical Research*, 2013.
4. Katoh, Y. and Y. Omura, Effect of the background magnetic field inhomogeneity on generation processes of whistler-mode chorus and hiss-like emissions, submitted to *Journal of Geophysical Research*, 2013.